



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN, DE GALERA TIPO TÚNEL EN LA CRIANZA DE POLLO PARA ENGORDE DE FRISA, CUMPLIENDO LA NORMA IEEE 43-2013, COMO MÉTODO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO DE MOTORES REPARADOS

Wuilmar Estuardo Velásquez Quezada

Asesorado por el Msc. Ing. Jorge Enrique Mejía Morales

Guatemala, octubre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN, DE GALERA TIPO TÚNEL EN LA CRIANZA DE POLLO PARA ENGORDE DE FRISA, CUMPLIENDO LA NORMA IEEE 43-2013, COMO MÉTODO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO DE MOTORES REPARADOS

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

WUILMAR ESTUARDO VELÁSQUEZ QUEZADA
ASESORADO POR EL MSC. ING. JORGE ENRIQUE MEJÍA MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez
EXAMINADORA	Inga. Armando Alonso Rivera Carrillo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN, DE GALERA TIPO TÚNEL EN LA CRIANZA DE POLLO PARA ENGORDE DE FRISA, CUMPLIENDO LA NORMA IEEE 43-2013, COMO MÉTODO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO DE MOTORES REPARADOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 14 de junio de 2018.

Wuilmar Estuardo Velásquez Quezada

Guatemala, 29 de septiembre de 2018.

Director
Otto Fernando Andriano González
Escuela de **Ingeniería Eléctrica**
Presente.

Estimado Director:

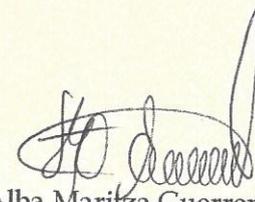
Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación de la estudiante **Wuilmar Estuardo Velásquez Quezada** con carné número **200113452**, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Ingeniería en Mantenimiento**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

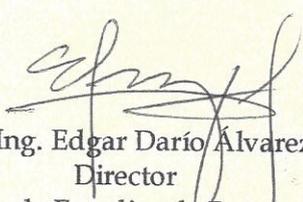
Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a todos"


Maestro. Ing. Jorge Enrique Mejía Morales
Asesor (a)


Doctora. Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola
Coordinadora de Área
Gestión y Servicios

ALBA MARITZA GUERRERO SPINOLA
INGENIERA INDUSTRIAL
COLEGIADA No. 4611


Maestro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Cc archivo/LZLA.

RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA: Proceso de Graduación aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.



El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística de su Proyecto de Graduación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN, DE GALERA TIPO TÚNEL EN LA CRIANZA DE POLLO PARA ENGORDE DE FRISA, CUMPLIENDO LA NORMA IEEE 43-2013 COMO MÉTODO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO DE MOTORES REPARADOS presentado por el estudiante universitario WUILMAR ESTUARDO VELÁSQUEZ QUEZADA, considerando que el protocolo es viable para realizar el Diseño de Investigación procedo aprobarlo, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Otto Fernando Andriano González
Director

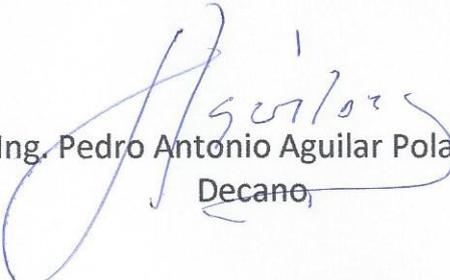
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN, DE GALERA TIPO TÚNEL EN LA CRIANZA DE POLLO PARA ENGORDE DE FRISA, CUMPLIENDO LA NORMA IEEE 43-2013, COMO MÉTODO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO DE MOTORES REPARADOS**, presentado por el estudiante universitario: **Wuilmar Estuardo Velásquez Quezada**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, octubre de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Jesucristo** Por ser mi Señor y Salvador, por darme la vida, la sabiduría y la fuerza para culminar mi carrera, además de bendecirme con tantas cosas y personas maravillosas cada día.
- Mi padre** Natalio Velásquez Ventura, por ser mi fuente de inspiración, ejemplo de superación y perseverancia. Gracias por heredarme tanta sabiduría.
- Mi madre** Paulina Quezada Salazar, por ser mi apoyo incondicional, por su amor y comprensión. Por confiar en mí y ser la luz que ilumina mi camino.
- Mi esposa** María de Los Ángeles Yox, por todos estos años de apoyo y sacrificio. Gracias
- Mis hijas** Estefany, Ángeles y Dulce, quienes son mi fortaleza y mi motor de superación, a quienes les dedico este pequeño logro de mi vida y que sea de ejemplo para sus años futuros. Gracias por venir a alegrar mi vida, (mis princesas).
- Mis hermanos** Silvia, Norma, Rubén, Otilia, Vivian y Yoselin, por ser mi compañía en todo momento y por

todos esos momentos que hemos compartido, sé que puedo confiar en ustedes. Gracias por su apoyo incondicional.

Mi abuela

Victoria Ventura (q. e. p. d.), por su paciencia y amor brindado durante su estancia en esta tierra hacia mi persona.

Mis tíos y primos

Por su apoyo y cariño incondicional.

Mis amigos

Abner, Alex, Alexis, Anael, Hugo y William, por compartir días de estudio, de desvelo, por ser parte de mi fortaleza y superación profesional.

AGRADECIMIENTOS A:

Guatemala

Mí querido país que me ha visto crecer y convertirme en un profesional.

Universidad de San Carlos de Guatemala

Por ser mi casa de estudios, que me ha brindado la formación académica y profesional.
Gracias gloriosa y tricentenaria universidad.

Facultad de Ingeniería

Por proporcionarme los conocimientos necesarios en toda mi formación académica.
Siempre pondré a mi Facultad en alto en cualquier parte del mundo donde esté.

Mis amigos de la Facultad

Con quienes viví una gran experiencia, llena de horas de estudio, en donde pudimos compartir muchas aventuras y buenos momentos.
Agradeceré siempre su apoyo y amistad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
3.1. Pregunta General.....	10
3.2. Pregunta Específica 1	10
3.3. Pregunta Específica 2.....	10
3.4. Pregunta Específica 3.....	10
4. JUSTIFICACIÓN	11
5. OBJETIVOS	13
5.1. Objetivo General	13
5.2. Objetivo Específico 1	13
5.3. Objetivo Específico 2	13
5.4. Objetivo Específico 3	13
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	15

7.	MARCO TEÓRICO	17
7.1.	Motores de Inducción	17
7.2.	Tipos de mantenimiento	21
7.2.1.	Mantenimiento correctivo.....	22
7.2.2.	Mantenimiento preventivo.....	23
7.2.3.	Mantenimiento predictivo.....	24
7.3.	Tipos de aislantes en un motor de Inducción	26
7.4.	Método de mantenimiento predictivo por medio de prueba de aislamiento e índice de polarización en motores de baja tensión, empleando Norma IEEE 43-2013.....	30
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	39
9.	METODOLOGÍA	41
9.1.	Diseño de investigación.....	41
9.2.	Tipo de Investigación.....	42
9.3.	Alcances de la investigación.....	42
9.4.	Variables cuantitativas.....	42
9.4.1.	Resistencia del aislamiento	42
9.4.2.	Índice de polarización	42
9.5.	Indicadores	43
9.6.	Fases de estudios	44
9.6.1.	Selección de la muestra	44
9.6.2.	Recolección de datos cuantitativos.....	44
9.6.3.	Análisis de datos cuantitativos.....	44
9.7.	Resultados esperados.....	45
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	47
10.1.	Gráfico circular	48

10.2.	Gráfico de barras	48
11.	CRONOGRAMA.....	51
12.	RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	53
12.1.	Recursos.....	53
12.1.1.	Recurso humano.....	53
12.1.2.	Recurso de material y equipo	53
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

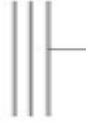
FIGURAS

1.	Diagrama equivalente de motor de inducción.	17
2.	Diagrama equivalente de Transformador referido al primario	18
3.	Motor Rotor Jaula de Ardilla	19
4.	Circuito de ensayo de medición de resistencia de aislación	35
5.	Cronograma de actividades	51

TABLAS

I.	Fases de la metodología y herramienta	16
II.	Ventajas Y desventajas del mantenimiento correctivo	23
III.	Ventajas Y desventajas del mantenimiento preventivo	24
IV.	Ventajas y desventajas del mantenimiento predictivo	26
V.	Clase de aislamiento y máxima temperatura de operación.....	28
VI.	Selección de la tensión en corriente continua	34
VII.	Valores recomendados de aislación	36
VIII.	Índice de polarización recomendado.....	36
IX.	Indicadores.....	43
X.	Rangos de índice de polarización	44
XI.	Recurso financiero	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
X_1 	Reactancia inductiva bobina de un motor sin pérdidas
R_1 	Resistencia de la bobina de un motor
	Núcleo, enchapado o carcasa de motor
	Fuente de tensión interna del aparato de medición del aislamiento

GLOSARIO

Aislante eléctricos	Material cuyas características físicas y químicas, no permiten con facilidad el paso de la corriente eléctrica.
Conductor eléctrico	Material cuyas características físicas y químicas, permiten el paso de la corriente eléctrica con facilidad.
Megger	Aparato eléctrico que permite la medición de resistencia eléctrica de grandes valores, del tipo aislantes.
Voltio	Unidad de medida de la diferencia de potencial, entre dos puntos.
Amperio	Unidad de medida de la corriente eléctrica que pasa por un punto determinado de un circuito.
Medición	Comparación de un valor obtenido, por medio de un aparato y un patrón ya establecido y normado.
Motor	Máquina eléctrica, diseñada para la conversión de energía eléctrica en energía mecánica.

Bobina	Arrollamiento de alambre magneto sobre un núcleo laminado, que, al ser sometido a una diferencia de potencial en sus puntas, genera magnetismo, que es canalizado por medio del núcleo.
Motor monofásico	Motor cuya estructura usa un bobinado de arranque y un bobinado de trabajo, para su funcionamiento, empleando una o dos fases del sistema
Motor trifásico	Motor cuya estructura usa tres bobinados, uno por cada fase del sistema.
HP	Por sus siglas en inglés (<i>horsepower</i>) unidad de medias de potencia y equivale a 746 watts
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (por sus siglas en inglés).
IEEE 43-2013	Norma que describe las recomendaciones para la medición de resistencia de aislamiento e índice de polarización, en máquinas eléctricas.
Efecto Joule	Pérdida de potencia activa, debida a la resistencia de un conductor, la cual se observa como calor y se representa y calcula como $P = I^2R$.
Mantenimiento	Conservación de una cosa en buen estado o en una situación determinada para evitar su degradación.

Micrón

Es una unidad de medida que representa la milésima porción del milímetro, o sea 0.001 mm, o referido al metro, su millonésima porción.

Mega Ohm

Millón de Ohms ($1 \times 10^6 \Omega$), es la medida con la que se representa la resistencia del aislante en los motores.

1. INTRODUCCIÓN

FRISA es una empresa dedicada a la crianza, destace y venta de pollo, la cual tiene sus granjas de engorde en toda la costa sur de Guatemala, ubicada en los departamentos de Escuintla, Santa Rosa, Retalhuleu y San Marcos. Cada una de sus granjas cuenta con un número variado de galeras, que van desde 13 hasta 21 unidades, cada una con capacidad promedio de 20,000 pollos. Comprendiendo la cantidad de pollos, se hace necesario que la cantidad de motores instalados funcionen bien, así garantizar la mayor cantidad de pollos que cumplen su vida en las galeras.

En el proceso de crianza, tienen participación una cantidad significativas de motores eléctricos, los cuales se utilizan para distribuir alimento, bebederos de agua y climatización. Los sistemas trabajan de manera autónoma, recibiendo órdenes de un procesador, el cual se retroalimenta de sensores para cada uno de los sistemas.

En las granjas de crianza de pollos de FRISA, se tiene una alta demanda de motores eléctricos trifásicos y monofásicos de recambio, por lo cual se tiene una alta incidencia en motores dañados, de los cuales no se ha encontrado la causa real del problema. Una galera de 200 m², utiliza alrededor de 11 motores extractores de aire, 8 motores para comederos de alimento y 2 bombas para agua de bebederos.

La mayor incidencia de motores dañados se ubica en el área de comederos y ventilación, tomando como tiempo de vida útil de un motor, 30 días, y una cosecha de pollos dura alrededor de 45 días. Con los parámetros

presentes, se observa que se utilizan alrededor de 40 motores en una cosecha, haciendo un sistema ineficiente y caro, situación que pone en peligro la vida de los pollos, ya que los motores se usan en la climatización y alimentación, básicos para ellos.

Conocer y resolver el problema de raíz, de la falla de los motores eléctricos, influiría directamente en los costos de operación, disminuyéndolos, en relación que sería una menor cantidad de motores usados de recambio y el costo hora/hombre se vería disminuido, puede dar atención a otros problemas que se presentan en una granja de pollo.

El mantenimiento predictivo a motores de inducción, con base a la norma IEEE 43-2013, da los lineamientos para la medición de resistencia de aislamiento e índice de polarización, para máquinas nuevas y usadas, con ello, determinar si el problema es la mala calidad del rebobinado de los motores o daño irreparable de los mismos.

Para el análisis, se tomará una galera de la Granja EL QUETZAL, ubicada en el Km. 80 autopista al puerto Quetzal como muestra, y se hará un seguimiento con mediciones y estadísticas durante 1 cosecha completa, para formar criterios de fallas recurrentes en motores eléctricos involucrados en la crianza de pollo de engorde.

Obtenidos los resultados estadísticos de las pruebas de aislamiento y polarización de los motores eléctricos de inducción ubicados en la galera No.21 de la granja EL QUETZAL, se efectuarán las recomendaciones necesarias para la mejora del mantenimiento correctivo de los motores eléctricos, con ello el rendimiento de las instalaciones y así disminuir la incidencia de motores dañados en los comederos y los extractores.

La investigación está contemplada en los siguientes capítulos:

Capítulo 1

Se detallan las generalidades del funcionamiento de los motores eléctricos de inducción de corriente alterna, los usos y características especiales que tienen los motores empleados en las galeras de engorde de pollo en las granjas de FRISA y la norma IEEE 43-2013 sobre el mantenimiento predictivo y medición de aislamiento en motores eléctricos

Capítulo 2

Detalla el proceso de toma de datos iniciales de aislamiento de motores instalados y motores reparados de reemplazo, con el aparato comprobador de estado de aislamiento marca **FLUKE** modelo **1507**, empleando la norma IEEE 43-2013, con el objeto de formular una base de datos estadísticos, la cual proporcione información del estado de los motores.

Capítulo 3

Muestra los resultados estadísticos, el procesamiento de los datos y su interpretación, comparándolos con los parámetros que da la norma IEEE 43-2013 sobre resistencia de aislamiento e índice de polarización en máquinas eléctricas rotativas de inducción, generando así un dictamen técnico/científico de las fallas más comunes encontradas en los motores eléctricos de inducción de corriente alterna empleados en las galeras de granjas de crianza de pollo de engorde de FRISA.

Capítulo 4

Con base a los resultados, se discuten estos, para obtener el dictamen de fallas comunes y se recomiendan un plan de mantenimiento, para resolver los distintos problemas encontrados en los motores eléctricos de las galeras de engorde de pollos de FRISA, con lo cual se busca incrementar la eficiencia de las instalaciones y con ello mejorar el proceso mismo de crianza de pollo.

2. ANTECEDENTES

FRISA como tal, nunca ha efectuado ninguna medición de aislamiento de motores eléctricos instalados o ingresados reparados, por lo cual no se cuenta ningún antecedente interno para ser tomado en cuenta y compararlo o en todo caso actualizarlo. Debido a no contar con esta información previa, los problemas de motores dañados son recurrentes y con ello elevan los costos de producción.

Alren (2015), efectúa un estudio sobre los materiales aislantes que se utilizan en motores eléctricos. Aborda el tema desde la clasificación de los aislantes y sus temperaturas de operación, y, efectuando un especial énfasis en los tipos de materiales de los que son fabricados y el daño que ocurre al momento de sobrepasar el nivel de temperatura máxima de operación. Se sabe que estos materiales son comunes en la reparación de motores en la actualidad, y, se tiene que tener presente las características de ellos para identificar su uso en cada uno de los diferentes motores eléctricos estudiados.

En el artículo de caso de análisis de Termogram (2008), sobre aislamiento en un motor eléctrico de un compresor de 150 Hp, 1780 rpm, conectado a 460V, hace alusión de un caso en el cual se complementa la medición de aislamiento con el de índice de polarización en motores eléctricos de inducción, esto con el fin de encontrar fallas que la medición de aislamiento no logra detallar. En el artículo indica que se efectuó prueba de aislamiento al bobinado del estator y se encontró en que los valores encontrados, se encuentran en los parámetros aceptables de operación con todo y su corrección por temperatura. Se efectuaron además mediciones del índice de polarización y

acá fue donde se encontraron problemas que la medición de aislamiento no logró captar. Se puede entonces asegurar que, la medición de la resistencia de aislamiento de un motor, debe llevar consigo como prueba paralela, la medición del índice de polarización. Esta es la razón por la cual se hace imperante la medición del índice de polarización en motores eléctricos, como complemento no excluyente, de la medición de resistencia de aislamiento.

López (2005), detalla las diferentes técnicas de ensayos de mantenimiento predictivo incluyendo la medición de aislamiento e índice de polarización, para el mantenimiento predictivo de motores eléctricos de inducción. Se describen las distintas fallas que pueden diagnosticarse por medio de mantenimiento predictivo, en los motores eléctricos de inducción, y cuáles son los resultados que presentan cada una de esas fallas. El mantenimiento predictivo es una herramienta que ayudará a conocer el estado del aislamiento de los motores reparados e instalados, esperando formar un historial y así por medio de acciones concretas, alargar la vida útil de los mismos.

En la Revista Prueba de Índice de Polarización (PI) Núñez (2013), detalla la teoría de la polarización de los dominios magnéticos de los materiales, incluyendo los aislantes. En el artículo plantea los niveles aceptados de índices de polarización, ya que el mismo si es alto puede ser engañoso, puede representar un deterioro térmico del aislante y eso cambia grandemente la naturaleza del aislamiento. Obteniendo los valores del índice de polarización que son aceptables o no aceptables, podemos tomar decisiones de seguirlo usando o sacarlo de uso para su readecuación o limpieza, a un motor de inducción en un mantenimiento predictivo.

El proceso de la medición del índice de polarización es considerado como el complemento de la prueba de aislamiento en motores eléctricos, siendo pruebas distintas, que son complementarias, pero no excluyentes. Con el resultado de las dos pruebas puede inferir en el estado del aislante de cualquier motor, en nuestro caso de estudio, motores de bajo voltaje.

Charvin Arnoux (2010), emplea la norma IEEE 43-2000 para detallar las recomendaciones que dicha norma da para la realización de la medición del aislamiento de un motor y su índice de polarización. En dicho artículo, presenta los valores mínimos que pueden ser tomados como aceptables en la medición de resistencia de aislamiento e índice de polarización, tomando en cuenta que se aplica solo a máquinas eléctricas bobinadas que no se encuentren sumergidas en aceite.

Aborda el tema de las corrientes que aparecen en la medición y su significado eléctrico, para comprender los fenómenos que se presentan al momento de dicho proceso. También hace referencia según la norma, del efecto que la temperatura ejerce en la medición de resistencia de aislamiento y se hace énfasis en el procedimiento de la medición de los 10 pasos, , con éste, despreciamos el efecto de la temperatura y con ello no afecta al diagnóstico. La IEEE 43-2000 y su posterior actualización IEEE 43-2013, presenta los parámetros recomendados para un mantenimiento predictivo a motores de inducción, abordándolo desde la explicación de las corrientes que aparecen cuando se efectúan las mediciones de resistencia de aislamiento e índice de polarización.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La incidencia de fallas en motores eléctricos de inducción, instalados en galeras de engorde de pollo en granjas de FRISA, es elevada, la vida promedio de un motor son 30 días calendario, esto hace ineficiente el trabajo de los motores en las instalaciones, elevando los costos de operación y manteniendo un nivel alto de riesgo en la mortandad de pollo de engorde.

Los motores de inducción instalados en las galeras de engorde de pollo, se emplean para la alimentación, hidratación y climatización del mismo, y cuando un motor falla se hace necesaria la reacción del personal de mantenimiento. El cuadro es recurrente, manteniendo elevados los costos de operación del departamento de mantenimiento y al final costo elevado de la cosecha de pollo.

El recambio de motores con la periodicidad con que se tiene es alarmante, tanto que hace que cada granja mantenga en stock una gran cantidad de motores eléctricos y tomando en cuenta el tiempo de reacción entre el momento de falla del motor hasta el cambio por otro, lo cual repercute en el nivel de mortandad del pollo, y con ello, las metas de producción se mantienen en valores inalcanzables.

La empresa tiene un interés grande en la localización de la falla y corrección del problema de los motores, tomando en cuenta que los departamentos producción y mantenimiento, son evaluado por rendimiento, dado que este tema en particular es uno de los problemas más grandes que se tiene en las granjas, dado su elevado costo y recurrencia.

3.1. Pregunta general

¿Qué tipo de mantenimiento se debe implementar para la mejora en el sistema eléctrico a motores eléctricos de inducción instalados en galeras de engorde de granjas de FRISA?

Para proceder con el planteamiento del problema, se formulan las siguientes preguntas:

3.2. Pregunta específica 1

¿Cuál es la causa principal de la falla de motores eléctricos de inducción instalados en galeras de engorde de granjas de FRISA?

3.3. Pregunta específica 2

¿Qué tipo de motores son afectados con el recambio de cada cosecha de pollo en galeras de engorde de granjas de FRISA?

3.4. Pregunta específica 3

¿Qué efecto tendrá la implementación del mantenimiento predictivo de motores eléctricos de inducción, en cumplimiento de la norma IEEE 43-2013?

4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de estudio se enmarca en la línea de investigación de normas internacionales de mantenimiento, de la maestría en Ingeniería de Mantenimiento de la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ingeniería y adicionalmente el trabajo, también corresponde a la línea de investigación de normalización de procesos, de la escuela de mecánica eléctrica.

Las granjas de engorde de pollo de FRISA, siempre ha tenido la problemática de una tasa elevada de recambio de motores eléctricos de inducción en sus galeras, tanto en los motores empleados en los comederos, bebederos y extractores de aire, por lo cual se hace necesario la investigación que lleve como finalidad de detallar los problemas que hacen ineficiente al sistema.

En la empresa FRISA no existe un estudio anterior sobre esta problemática, llegando a considerar que las anomalías son normales, lo que hace importante la realización de ésta investigación para detallar las causas que provocan el elevado costo del mantenimiento de motores eléctricos de inducción.

La investigación analiza la mejora de la eficiencia del funcionamiento de los motores eléctricos de inducción, considerando que todas las instalaciones eléctricas y mecánicas son las adecuadas, sabiendo que, encontrando las causas de las fallas, se pueden resolver puntualmente y así disminuir la cantidad de motores de recambio.

Analizando la problemática, se hace necesaria la investigación del caso, debido a que se puede aplicar los conocimientos de mantenimiento predictivo en motores eléctricos de inducción con base a normas internacionales establecidas y adoptadas por nuestros sistemas de mantenimiento. Esto es importante, cuando el efecto de un mantenimiento predictivo, bien aplicado, es el ahorro de recursos, debido a que enfocado a las causas de las fallas más recurrentes.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Implementar mantenimiento predictivo, con base a la norma IEEE 43-2013, para las mejoras en las instalaciones y/o reparación de motores eléctricos de inducción, empleados en el sistema de galera de engorde de pollo No. 21 de granja EL QUETZAL, que proporcione un aumento en la eficiencia del proceso.

5.2. Específico 1

Identificar las causas más significativas que provocan el daño a los motores eléctricos de inducción instalados en las galeras de granjas de pollo de engorde de FRISA.

5.3. Específico 2

Establecer los tipos de motores que son los más susceptibles a recambio en cada cosecha de pollo en galeras de engorde.

5.4. Específico 3

Describir los efectos que tendrá la aplicación de mantenimiento predictivo con base a la norma IEEE 43-2013, utilizando equipo de medición FLUKE 1507, en los motores de inducción instalados en galera de pollo.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Tomando como base la norma IEEE 43-2013, para mantenimiento predictivo de motores de inducción, se identifican las causas de las fallas más recurrentes que nos provocan los daños en los motores eléctricos de inducción, se proponen acciones puntuales para disminuir la cantidad de motores dañados por cosecha.

Con base a los resultados estadísticos científicos y utilizando la herramienta paretos, para el mantenimiento predictivo de motores eléctricos de inducción, se identifican las causas de fallas más significativas, que provocan daño en los sistemas y con estos datos, buscar las acciones pertinentes para mejorar del desempeño de los motores eléctricos de inducción instalados en galeras de granjas de pollo de engorde de FRISA.

Con el análisis de recurrencias de fallas e identificando los motores que son más susceptibles a recambio por dichas causas, se analizará la implementación de acciones que nos permita bajar la incidencia de falla de estos motores.

Partiendo de la premisa que, si se puede medir, se puede controlar y se puede mejorar, con las propuestas de cambios y mejoras en los sistemas eléctricos de las galeras de las granjas de pollo, se obtendrá una mejora de la eficiencia en los equipos de motores eléctricos de inducción instalados.

Tabla I. **Fases de la metodología y herramienta**

No.		Fase	Metodología	Herramienta
1		Medición de la totalidad de motores reparados y funcionando en galera de pollo	Medición empleando la norma IEEE 43-2013	Equipo de medición FLUKE 1507 Base de datos en Office Excel 2016
2		Análisis de las variables que intervienen en el proceso de la medición de aislamiento e índice de polarización	Empleando recursos de Estadísticas descriptiva y observando tendencias	Office Excel 2016 como base de datos y herramienta Pareto para la identificación de fallas focalizadas
3		Plan de acción enfocado a la mejora del sistema	Formular plan de mantenimiento predictivo	Planificación Presupuesto Cronograma

Fuente: elaboración propia.

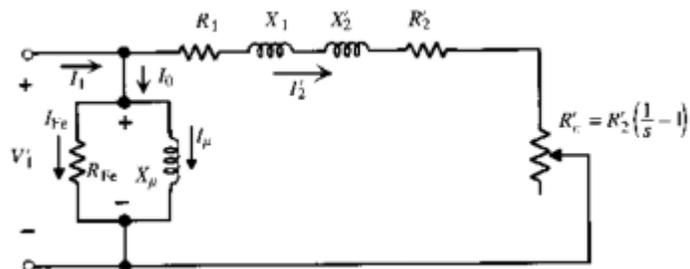
7. MARCO TEÓRICO

7.1. Motores de Inducción

Los motores de inducción hoy en día, son equipos eléctricos más empleado en la industria, por su versatilidad, simplicidad y fácil control. Parafraseando a Mora (2003), el motor de inducción también es conocido como máquina asíncrona, debido a que la velocidad de giro del rotor, no es la misma que la velocidad de giro del campo magnético, apareciendo acá el término desplazamiento, el cual es la relación entre estas dos velocidades. En los motores de inducción o motores asíncronos, el deslizamiento será mayor al crecer la carga impuesta en el eje del rotor.

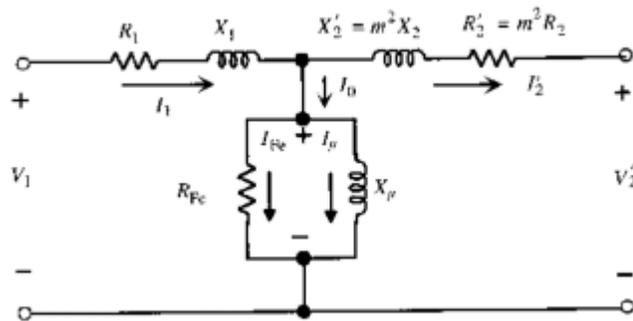
El motor de inducción es una máquina con una analogía de funcionamiento con el transformador, ya que los dos funcionan con el mismo principio y para modelarlos, sus diagramas son bastante similares.

Figura 1. Diagrama equivalente de motor de inducción



Fuente: Mora (2003 p. 277)

Figura 2. **Diagrama equivalente de transformador referido al primario**



Fuente: Mora (2003, p. 185)

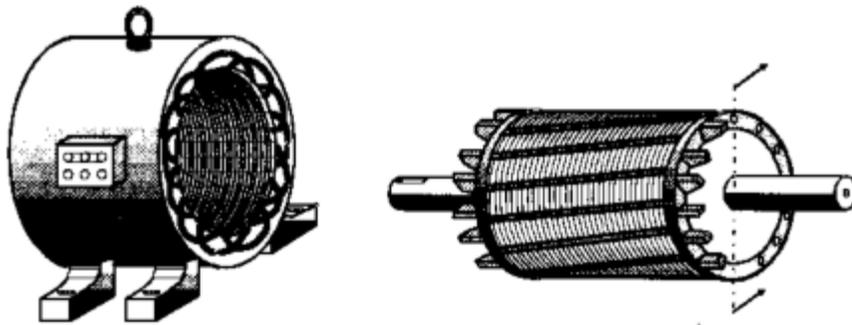
La diferencia entre los dos modelos, radica en que el secundario del motor está cortocircuitado y no abierto como en el transformador, y también en que el deslizamiento lleva una concordancia con la carga, a mayor carga mayor deslizamiento, lo cual provoca una disminución en la velocidad de rotación del eje.

Los aspectos constructivos de los motores de inducción en general, consta de dos partes principales, de las cuales se pueden desglosar partes para nuestro estudio. Las partes principales de un motor de inducción son: Rotor Jaula de ardilla o en cortocircuito y Devanado de Estator

El rotor Jaula de ardilla es el que funciona como secundario y es al cual se le induce una tensión, la cual provoca una corriente que, también esta será de cortocircuito, porque el rotor se encuentra en cortocircuito, hasta que él se ponga en movimiento. El rotor Jaula de ardilla es un devanado compuesto por barras de cobre o aluminio, cortocircuitadas en sus extremos, montadas en medio de un núcleo ferromagnético laminado, el cual es el encargado de recibir el flujo magnético inducido por el estator. Este devanado con su núcleo se

encuentra fijamente unido con el eje, el cual es el encargado de transmitir movimiento a la carga.

Figura 3. **Motor rotor jaula de ardilla**



Fuente: Readeuada Mora (2003, p. 261 y 262)

El núcleo del rotor Jaula de ardilla, se encuentra laminado, esto con la finalidad de reducir las corrientes de Foucault o corrientes de Eddy, existiendo entre cada una de las láminas barniz aislante que funciona para mantenerlas unidas, pero principalmente que no exista contacto entre cada una de las láminas.

El estator también llamado inductor, es la parte que se conecta a la red de suministro, creándose en el campo magnético en su bobina. El campo magnético creado en el estator, es un campo variante en el tiempo, tanto de valor como de dirección (alterno), por lo cual, por la ley de Faraday, éste, induce una tensión en el devanado del rotor, el cual, por encontrarse en cortocircuito, generará una corriente, generando a su vez un campo magnético. Por la Ley de Lenz, este campo magnético tiene una dirección contraria al campo magnético que lo creó. Las interacciones de estos dos campos magnéticos provocan que el rotor gire y trate de alcanzar al campo magnético del estator.

En el momento de la energización del motor, como el rotor se encuentra detenido, el deslizamiento es 1, cuando ya se pone en movimiento el eje, este disminuye significativamente, en cuanto menos sea el valor del deslizamiento, muestra que la velocidad de giro del campo magnético del rotor está cada vez más cercana a la velocidad de giro del campo magnético del estator

Chapman (2000), analiza el deslizamiento, en relación a el voltaje inducido en las barras del rotor, si la velocidad del rotor fuera la misma que el estator (campos magnéticos), no existiera voltaje inducido, por ende, no existiera corriente de corto circuito en el rotor, provocando que este se detenga.

Analizando estos argumentos, se considera que el deslizamiento es algo innato en el motor de inducción, lo cual no se puede eliminar, tan solo reducir y que éste depende de la carga impresa en el eje. El deslizamiento se puede representar con un valor en p.u. con base a la velocidad de sincronismo del motor, oscilando su valor entre 0 y 1.

El único momento en que el motor tiene un deslizamiento igual a 1 es el momento en el que se energiza, donde la velocidad del campo magnético del rotor y estator son las mismas, ya iniciando su movimiento la velocidad del campo del rotor es menor que la velocidad del estator, ya que el campo del rotor sigue al del estator, tratando de alcanzarlo y esta distancia se hace más grande dependiendo de la carga.

$$s = \frac{W_s - W_m}{W_s}$$

Donde:

W_s = Velocidad de sincronismo de campo magnético del estator

W_m = Velocidad de campo magnético del rotor

s = Deslizamiento en un rango de 0 – 1

7.2. Tipos de mantenimiento

Abella (2003), describe el mantenimiento, como el conjunto de acciones encaminadas a la preservación y conservación de equipos e instalaciones de un lugar. Estos con la finalidad que su operación no sea interrumpida por una falla imprevista y paro lo cual no estemos preparados. Al tener nuestros equipos disponibles, garantizamos la operación y productividad, con lo cual hacemos eficientes nuestras instalaciones. Par este efecto utilizamos diferentes técnicas de mantenimiento, con el fin de mantener operativos los equipos y que la producción no pare por un fallo, debido a la falta de atención de los mismos.

El mantenimiento se realiza para hacer más confiables nuestras instalaciones, con ello cumplimos varios objetivos

- Evitar, reducir y en dado caso aparecieran repara los fallos.
- Reducir el impacto de los daños que aparecen.
- Reducir los paros inesperados por fallos.
- Conservación de equipos y maquinarias (prolongar su vida útil).
- Reducción de gastos de operación.
- Evitar accidentes o incidentes por falla de equipos.

Las técnicas utilizadas son:

7.2.1. Mantenimiento Correctivo

Cornú (2010) aborda el tema de mantenimiento correctivo, como las acciones encaminadas a cambiar o reacondicionar partes de un equipo cuando este ya haya fallado y que ocurre como una emergencia. Cuando un equipo deja de operar por algún desperfecto, se procede de manera emergente, a hacer la inspección necesaria del fallo y a reemplazar la o las piezas dañadas y tener el equipo operando en el menor tiempo posible. Este tipo de mantenimiento en relación a piezas algunos consideran que es el más barato, ya que solo se cambian los componentes que se dañan, pero por otro lado si lo vemos del lado productivo y de vida útil del equipo, nos representa un alto costo, ya que los paros inesperados detienen la producción y algunas veces el equipo no estará disponible por un período largo de tiempo, afectando la eficiencia de las instalaciones y los ingresos de la empresa. Este tipo de mantenimiento es adecuado para equipos los cuales es complicado predecir fallos (por ejemplo, electrónicos) y equipos que no permiten tener paradas en cualquier momento para su reparación.

Tabla II. **Ventajas y desventajas del mantenimiento correctivo**

VENTAJAS	DESVENTAJAS
No es programado	Paro inoportuno d equipos
Bajo costo en recambio de piezas programadas	Por la falta de mantenimiento, en ocasiones una pieza dañada, ocasiona daños irreparables en una o unas piezas adicionales
Se trabaja solo para reparar la falla existente	Por ser paros inesperados, provoca altos costos en la producción
Es el tipo de mantenimiento más usado, debido a que no necesita planificación y reducción de los costos de las demás técnicas de mantenimiento	Los períodos de reparación pueden ser largos, debido a que por no tener un historial de mantenimiento del equipo, no contamos con piezas de recambio que ya sabremos que podrían fallas.

Fuente: elaboración propia.

7.2.2. Mantenimiento preventivo

Pesántes (2007), detalla cómo mantenimiento preventivo, el procedimiento que va encaminado a tener una programación de actividades necesarias que nos garanticen el buen funcionamiento de los equipos. Esta técnica implica el cambio de piezas que se consideran que llegaron a su vida útil o que presentan algún daño significativo, el cual nos puede provocar una parada repentina del equipo.

Se considera uno de los mantenimientos más caros, ya que se tienen que emplear un alto costo en piezas, materiales y personal para la realización de este, pero a su vez se cumple el fin, de mantener los equipos operables el mayor tiempo posible. Este tipo de mantenimiento tiene la gran ventaja por ser programado, se puede concatenar tiempos con producción, con el fin de no

afectar los indicadores de producción ni de disponibilidad de los equipos y de las instalaciones.

Tabla III. **Ventajas y desventajas del mantenimiento preventivo**

Ventajas	Desventajas
Nos permite programar de una manera ordenada la ejecución del mantenimiento	Alto costo en partes y personal
Mantiene los equipos operando el mayor tiempo posible	Cambio innecesario e piezas
Nos permite conocer nuestros equipos y con ello tener partes de recambio	

Fuente: elaboración propia.

7.2.3. Mantenimiento predictivo

Núñez (20017), enmarca como mantenimiento predictivo, el proceso que consta de actividades para la medición, monitoreo, seguimiento y diagnóstico continuo del funcionamiento de uno o varios equipos. Este tipo de mantenimiento permite conocer el estado actual del equipo y con ello tomar acciones inmediatas o programadas. Una de las grandes ventajas de este tipo de mantenimiento es que en su mayoría se efectúa con el equipo en operación, en condiciones de plena carga o uso y con ello nos permite conocer cómo se comporta en las condiciones de trabajo reales el equipo. Algunas de las técnicas de mantenimiento predictivos son: termografía, ultrasonido, análisis de vibraciones, análisis de aceite, medición de aislamiento de motores eléctricos, etc.

El mantenimiento predictivo, por el monitoreo constante que se realiza al equipo, nos presenta ahorros operativos, ya que disminuye el mantenimiento

correctivo y el mantenimiento preventivo se hace más efectivo y focalizado dependiendo los resultados del monitoreo.

Otros de los beneficios de este tipo de mantenimiento es que, como se detectan las anomalías tempranamente, podemos reducirlas también tempranamente y con ello evitar que lleguen a ser fallas que, aunque sean programadas tienen un costo de partes y personal.

Para la realización de un mantenimiento predictivo se tiene que contar con la información necesaria previa, ya que un mantenimiento predictivo consta de la comparación de los valores de una variable y su cambio en el tiempo de operación del equipo. Si no cuenta con esa información previa, necesitamos formar nuestro historial de este equipo o la medición de un equipo nuevo, aunque esto último algunas veces es más complicado de hacer, pero en definitivamente, tenemos que tener un valor base de las variables en estudio, para hacer las comparaciones y así saber cuándo ya existe un cambio significativo que amerite una acción.

Tabla IV. **Ventajas y desventajas del mantenimiento predictivo**

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Monitoreo constante de las variables de operación del equipo	Alto costo de equipos para la realización del mantenimiento
Detección temprana de fallas o anomalías	Personal calificado y con experiencia para el manejo del equipo y análisis de resultados
La mayoría de veces no necesitamos sacar de línea el equipo para realizarle mantenimiento predictivo	
Reducción de costos en mantenimiento correctivo y preventivo	
Nos permite programar con bastante antelación, reparaciones antes que el equipo pare por falla	
Reducción de stock de piezas innecesarias en almacén	

Fuente: elaboración propia.

7.3. Tipos de aislantes en un motor de Inducción

“Un material aislante es aquel cuya resistividad (propiedad intrínseca de un material) es bien grande, mayor a $10^{10} \Omega m$, por lo cual son unos malos conductores de la electricidad. Solo para tomar una referencia, cobre que es un buen conductor tiene una resistividad de $0.0172 \Omega m$, con esto vemos una gran diferencia entre estos materiales” Núñez (2013) Clase de aislamiento - materiales aislantes. Esta propiedad es una de las principales, pero no la única que debe cumplir un material para ser utilizado como un aislante en una máquina eléctrica.

Todo material que se utilice para aislamiento de motores eléctricos debe de contar con una gran resistividad eléctrica, también debe tener la

característica de soportar los esfuerzos dinámicos que se presentan por el efecto magnético y por vibraciones de los núcleos en movimiento y otra característica no menos importante, que tenga la propiedad de mantener sus características eléctricas y mecánicas a la temperatura máxima de operación de la máquina.

Recordando que un motor eléctrico, es una máquina que transforma energía eléctrica en energía mecánica, comprendemos que para realizar esta transformación, se van a generar pérdidas de energía, y una de las más marcadas es la de efecto Joule I^2R , que es la que me genera calor por la resistencia que presenta el cobre de las bobinas.

Como bien es sabido, la temperatura es uno de los fenómenos que tratamos de controlar en los motores eléctricos, esto es debido a que si sobrepasamos el nivel máximo de temperatura que soporta un aislamiento, éste sufre un deterioro exponencial, con lo cual comprometemos la vida útil del motor o en un caso extremo.

Las unidades de potencia de un sistema hidráulico son las encargadas de convertir la energía mecánica, neumática o eléctrica, en energía hidráulica puede ocurrir una falla catastrófica. Un aumento de temperatura de 10°C sobre la temperatura máxima de operación, se puede reducir a la mitad la vida útil del equipo.

Entonces, sabiendo que, el sistema de aislamiento de motores eléctricos juega un rol importante en el buen funcionamiento y tiempo de vida útil del equipo, se hace importante tener la habilidad de clasificarlos, según su temperatura y comprender que, del cuidado de éste, depende la vida del motor.

Puesto que en el motor eléctrico se cuenta con un número considerable de tipos de aislantes, por ejemplo: el aislante tipo barniz que lleva el alambre magneto, el papel en la ranura del enchapado, el cual separa la bobina del núcleo, el papel de separación entre bobinas o entre fases, las cintas de sujeción de bobinado, las cuñas de ranuras, etc., se hace imperativo el estudio de la selección y el cuidado de estos materiales.

Por tanto, la Asociación de Fabricantes de Equipo Eléctrico y de Imagenología Médica, ha establecido una tabla en la cual se clasifican los tipos de aislamiento eléctrico según su temperatura máxima de operación que pueden soportar.

Tabla V. **Clase de aislamiento y máxima temperatura de operación**

TEMPERATURA LÍMITE POR CLASE DE AISLAMIENTO			
CLASE DE AISLAMIENTO	DE	TEMPERATURA LÍMITE EN °C	TEMPERATURA LÍMITE EN °F
A		105	221
E		120	248
B		130	266
F		155	311
H		180	356
N		200	392
R		220	428
S		240	464
C		+240	+464

Fuente: Readecuada de Alren (2015, p.1)

Ésta tabla indica que, con una temperatura ambiente de 40°C el máximo incremento de temperatura que puede tener el motor eléctrico, no debe sobrepasar el límite de la clase de aislamiento con la que está construido. El

dato de la clase de aislamiento, es un dato que podemos encontrar en la placa característica de los motores eléctricos.

Los distintos materiales usados para aislamientos en motores eléctricos según Alren (2015) son los siguientes:

Los aislantes de clase A, en sólidos son en su mayoría, algodón, seda, rayón, poliamidas, acetato de celulosa, esmaltes de resina de políester y en líquido como barnices naturales y sintéticos. Son usados en su mayoría en recubrimientos de ranuras y espaguetis.

Los aislantes clase E, en sólidos suelen ser de materiales como fibras orgánicas sintéticas, como el acetato de polivinilo y en líquido en barnices de resinas alquídicas y son empleados para aislamiento de ranuras en los motores.

La clase B, en aislantes sólidos lo encontramos como tejidos de fibra de vidrio, amianto, esmaltes a base de poliuretano y polivinilos, caucho, etileno-propileno, y en líquido como barnices y resinas a base de epóxicos, melaninas y poliéster reticulado. Estos son usados para aislar ranuras y bobinas, separadores de delgas de colectores.

Los aislamientos catalogados como clase F, forma de sólidos los podemos encontrar de materiales como tejidos de fibra de vidrio barnizados, papeles de mica y amianto y en líquidos como los barnices y esmaltes a base de poliéster modificado, polietileno, poliuretano, poliamidas y resinas epóxicas. Lo empleamos normalmente en aislamiento de ranuras de núcleos y recubrimiento de conductores.

La clase F de aislantes, son en forma de sólidos de materiales como tejidos de fibra de vidrio, amianto, mica, impregnados de silicona y en forma líquida esmaltes de silicona, poliéster, poliuretano y poliesterimida. Su uso lo localizamos en aislamiento de ranuras impregnación de bobinados y recubrimiento de conductores.

Partiendo de saber que en el aislamiento del motor esta su vida, comprendemos la importancia de efectuarle mediciones constantes de su condición, por ende, el cuidado que debemos de tener para que este se mantenga con sus propiedades que el fabricante le impuso y así garantizar el buen funcionamiento durante su vida útil del equipo.

7.4. Método de mantenimiento predictivo por medio de prueba de aislamiento e índice de polarización en motores de baja tensión, empleando Norma IEEE 43-2013

La técnica de medición de aislamiento como mantenimiento predictivo para motores eléctricos, es un procedimiento que desde décadas se ha implementado como una práctica que sirve como herramienta para la toma de decisiones. Tiene como finalidad conocer el estado del actual de los aislamientos de los motores eléctricos, con el objeto de darle seguimiento durante su deterioro normal de vida útil o de localizar un descenso brusco de la resistencia de estos, con lo cual indicaría un problema serio y qué haría hasta en un caso extremo, sacar de uso el motor en estudio.

Según la norma IEEE 43-2013, La prueba de aislamiento en un motor como tal, no nos proporciona ningún dato (al menos que exista falla considerable en el motor), solo nos arroja un valor, pero si efectuamos estas pruebas durante periodos establecidos y con condiciones ambientales similares,

se puede formar una base de datos y con ello construir una tendencia en el deterioro del aislamiento. Esto indica que la medición de aislamiento en un motor, debe de ser periódica, con lo cual se puede tomar acciones cuando nuestro valor de resistencia de aislamiento sea de un valor cercano o inferior al mínimo que se recomienda, antes que provoque paros inesperados o en todo caso un corte de energía completo en el sistema.

Por otro lado, la medición del índice de polarización, es una prueba que indica si existe contaminación del medio circundante, esta contaminación puede ser de polvo, humedad, aceites, químicos, etc., presentes en el aislante, por ello se vuelve importante su medición, ya que se puede tener un aislante en buen estado, pero con contaminación presente, que hace que sea peligroso para la máquina.

Por tanto, en la prueba de aislamiento de un motor, aplicando una tensión de CD, se presentan cuatro tipos de corrientes, que no se pueden separar para su estudio y por ende se hace necesario tener conocimiento de ellas para entender su comportamiento. Las cuatro corrientes que aparecen en este sistema de medición son: Corriente capacitiva, corriente de conducción, corriente de fuga superficial y corriente de absorción.

La corriente capacitiva es la que se presenta cuando energizamos el circuito conformado por la bobina y el aislante, y por las características de este último, se forma un capacitor, y como se sabe, un capacitor conectado en un circuito de CD, tiene un gran valor de corriente al inicio mientras se carga, pasado el tiempo de carga, alrededor de los 5τ , y $\tau = RC$, indica entonces que el tiempo depende de la resistencia del circuito, tanto del bobinado como del aislante, y de la capacitancia que se forma entre la bobina y el aislante. Esta corriente es grande, porque el capacitor en CD en el instante $t = 0$ se comporta

como un cortocircuito o sea su corriente es la máxima y pasado el tiempo $t = 5\tau$ la corriente es cercana a cero. Este es el motivo por el cual se debe de dejar pasar un tiempo prudencial antes de tomar nuestra primera lectura, ya cuando esta corriente capacitiva sea despreciable o cero. Un motor puede llegar a medir una capacidad entre su bobinado y aislante de hasta 100nF, y la corriente capacitiva puede llegar a decaer a un valor cercano a cero, en menos de 10 minutos.

En cuanto a la corriente de conducción, es una que circula de los bobinados hacia el núcleo pasando por el aislante superficialmente. Esto debido a contaminación principalmente de agua, ocurre en motores antiguos, en motores que hayan estado expuestos a humedad. Cuando existen fisuras en el aislante aparecen estas corrientes de fuga. La corriente de conducción tiene la particularidad que es constante en el tiempo, por lo cual, si se tiene una corriente que circula y no desciende su valor, es de considerar que se tiene una falla de aislamiento o en todo caso humedad.

La corriente superficial de fuga, es la que se presenta netamente por contaminación del aislante como humedad, aceite, polvo, cenizas o químicos. En un motor nuevo o rebobinado, esta corriente es nula, por lo cual, si se tiene un valor alto constante de corriente, es indicativo de un problema, el cual se necesita poner atención.

En cuanto a la corriente de absorción, es la que aparece como efecto de un material expuesto a un campo eléctrico, esto obedece a que todo material en presencia de un campo eléctrico, tiende a orientar sus dominios magnéticos, en este caso el material es el aislante, para lograr orientar sus dominios magnéticos se necesita cierta energía y por ende cierta corriente, la cual conforme el tiempo va transcurriendo tiende a ser cero. Esta corriente al igual

que la corriente capacitiva, no indica que un aislamiento esté en buen estado o en mal estado, simplemente son efectos de las características de los aislamientos.

Sabiendo esto, cabe mencionar que, en una prueba de aislamiento de un motor, no podemos dividir cada una de las corrientes, por ello se debe de dejar transcurrir un lapso de tiempo considerable para tomar un dato confiable.

La norma IEEE 43-2013 presenta los lineamientos mínimos, para la realización del proceso de medición de aislamiento en máquinas eléctricas rotativas mayores a 750W (1HP), como los son motores de inducción, motores de DC, motores sincrónicos y condensadores sincrónicos. Esta norma exceptúa máquinas bobinadas inmersas en aceite, como lo son los transformadores y motores sumergidos en aceite, los cuales son regidos por otro tipo de normativo.

La norma indica que para motores de baja tensión (hasta 1KV), la tensión máxima de prueba para la medición de resistencia de aislamiento debe de ser de 500V, como lo muestra la tabla, y en el caso en estudio todos son motores de 240V en monofásico y trifásico, por lo cual se hace uso de esta recomendación.

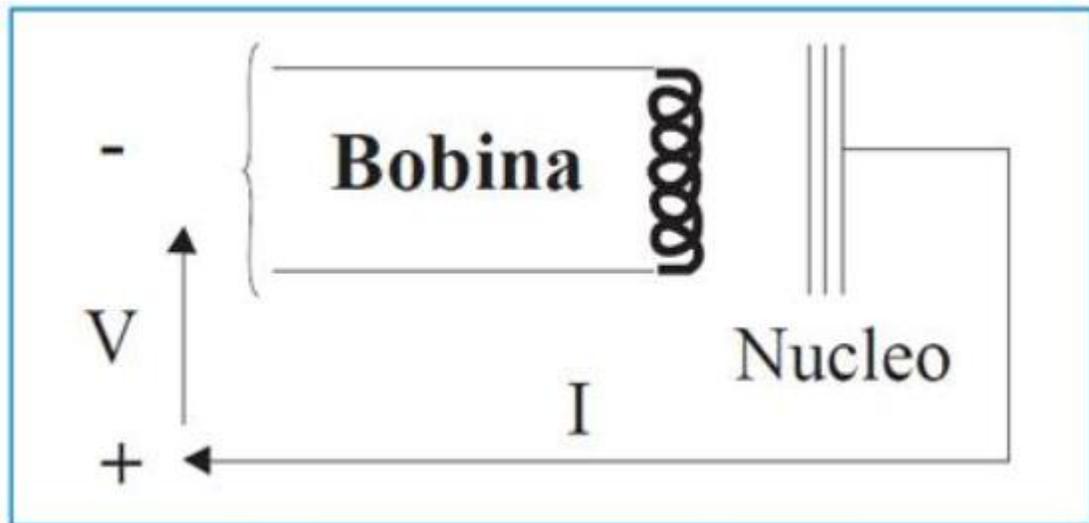
Tabla VI. **Selección de la tensión en corriente continua**

Tensión nominal del bobinado (V)	Tensión en CC del ensayo (V)
<1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

Fuente: Tomado de Núñez (2014, p.2)

Por consiguiente, la norma hace la recomendación del diseño del circuito de medición entre la bobina y la carcasa o núcleo, pasando por el aislante en estudio. Nos propone colocar el terminal positivo a la carcasa y el terminal negativo conectado directamente al bobinado del motor en estudio.

Figura 4. **Circuito de ensayo de medición de resistencia de aislación**



Fuente: Núñez (2014, p. 2)

Se recomienda para esta medición si el motor es monofásico, efectuar la medición uniendo las puntas de los bobinados (arranque y marcha) hacia el polo negativo del medidor y el polo positivo a la carcasa del motor. El en caso que fuese trifásico, de igual manera, se efectúa una medición con las tres puntas de las tres fases al polo negativo del medidor y el polo positivo a la carcasa misma del motor.

La norma IEEE 43-2013, da lineamientos recomendados para el rechazo de un motor por una baja medición de resistencia de aislamiento, esto con la finalidad de identificar motores con daño o con un aislamiento defectuoso.

Tabla VII. **Valores recomendados de aislación**

Valor mínimo de resistencia de aislación (MΩ) @ 1 minuto	Tipo de equipo en prueba
kV + 1	Mayoría de bobinados hechos antes de 1970, y los no incluidos en los siguientes tipos de equipos
100	Mayoría de bobinados preformados de corriente alterna hechos después de 1970
5	Mayoría de máquinas de bobinado aleatorias y preformado menores a 1kV, y armaduras de corriente continua

Fuente: Tomado de Núñez (2014, p.2)

En cuanto al índice de polarización, la norma da la recomendación del valor mínimo y máximo que debe tener un motor en condiciones normales o buenas de funcionamiento, y lo resume en la siguiente tabla:

Tabla VIII. **Índice de polarización recomendado**

Clase de aislamiento	Índice de polarización	Evaluación
B, H y F	2	Aceptable
B, H y F	<2	Problema potencial
B, H y F	>4	Excelente

Fuente: Readecuada de Arnoux (2010, p.5)

El proceso de medición de aislamiento de motores eléctricos, con base a las recomendaciones de la norma IEEE 43-2013, se efectúa de la siguiente manera:

- Elegimos el motor en estudio, lo aislamos del sistema, desconectándolo de la red, incluyendo el aterrizaje, guardando todas las normas de seguridad al trabajar con circuitos eléctricos, como lo son: bloqueo y etiquetado de circuitos de protección para no sufrir ningún accidente o averías al equipo. Si fuera posible sacar el motor del lugar donde esté instalado.
- Una vez se tiene el motor aislado del sistema, efectuamos la unión de los cables de salidas de las distintas bobinas, y, conectamos estos cables al polo negativo del medidor FLUKE 1507, y el polo positivo, a un punto de buen contacto de la carcasa del motor.
- Se coloca la escala de 500V en el medidor FLUKE 1507, y se procede a energizar el circuito.
- Se toman lecturas de resistencia de aislamiento desde el minuto 1, hasta el minuto 10.
- Si el valor de resistencia de aislamiento es menos a los $5M\Omega$, es un motor que no pasa y se hace la recomendación de no reinstalarlo o no ponerlo en servicio si es un motor reparado.
- Calcular el índice de polarización con la ecuación de $\frac{R_{t10}}{R_{t1}} = IP$, tomando también en cuenta la recomendación que se hace en la norma IEEE 43-2013, sobre el mínimo valor que debe de tener el índice de polarización.

- Una vez realizada la medición, se deja en cortocircuito entre las bobinas a tierra del motor, durante un lapso de 5 veces el tiempo que se utilizó para la medición, tomando en cuenta la recomendación de IEEE 43-2013
- Dependiendo de los valores de resistencia de aislamiento y de Índice de polarización, recomendamos si el motor se debe seguir utilizando o si es reparado, si se acepta el servicio o se rechaza.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE TABLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS
ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Motores de inducción

1.2. Tipos de mantenimiento

1.2.1. Mantenimiento correctivo

1.2.2. Mantenimiento preventivo

1.2.3. Mantenimiento predictivo

1.3. Tipos de aislantes en un motor de inducción

1.4. Método de mantenimiento predictivo por medio de prueba de
aislamiento e Índice de polarización en motores de baja tensión,
empleando la norma IEEE 43-2013

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO A MOTORES DE GALERA 21 GRANJA QUETZAL

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO, CON BASE A NORMA IEEE 43-2013

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO Y DE MEJORAS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO Y RECEPCIÓN DE MOTORES REPARADOS, CON BASE A RESULTADOS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO CON BASE A NORMA IEEE 43-2013

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

9. METODOLOGÍA

9.1. Diseño de investigación

El diseño de la investigación será no experimental, ya que no se refiere a un estudio en el que se manipulen intencionalmente una o más variables, por el contrario, solo se estudiará la evolución.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la investigación será longitudinal.

Se ha seleccionado longitudinal o evolutiva porque se recaban los datos en diferentes puntos del tiempo, esto para realizar inferencias acerca del estado del aislamiento en motores eléctricos.

Las muestras se tomarán una vez ingrese el motor rebobinado a bodega de granja y a los motores instalados y medirán en punto una sola vez, debido a que por el proceso no se pueden sacar de uso periódicamente, hasta que se termine la cosecha. Se efectuará medición de los motores instalados al momento de terminar su uso en el periodo productivo.

Según Hernández (2010), los estudios longitudinales son de tres tipos, para la presente investigación se seleccionó el diseño longitudinal de tendencia, debido a que se analizarán los cambios en las muestras con el paso del tiempo.

9.2. Tipo de Investigación

La investigación será de tipo cuantitativa, ya que se harán mediciones en motores eléctricos, y descriptiva, con el objeto de estudiar las variables y predecir con ellas los diferentes escenarios que se pueden presentar para los motores.

Así mismo será secuencial, que seguirá un método riguroso.

9.3. Alcances de la investigación

Entre los cuatro tipos de alcances que existen, se eligió el descriptivo, debido a que únicamente pretende medir y recolectar información de manera independiente y describirla.

9.4. Variables cuantitativas

Se medirán la resistencia del aislamiento a 1 minuto y a los 10 minutos de la prueba y el índice de polarización.

9.4.1. Resistencia del aislamiento

Se medirá conforme a las recomendaciones que da la norma IEEE 43-2013, para comparar y diagnosticar el estado del aislante.

9.4.2. Índice de polarización

Se calculará en índice de polarización, tomando las recomendaciones de IEEE 43-2013, con base a la ecuación $IP = \frac{R_{t10}}{R_{t1}}$ y con este resultado

diagnosticar si este motor cuenta con su sistema de aislamiento en buen estado.

9.5. Indicadores

El objetivo de la norma es simplificar el informe de los datos obtenidos de recuento de partículas.

Dependiendo del valor de resistencia de aislamiento e índice de polarización utilizamos las tablas de valores mínimos para el criterio de pasa o no pasa la medición.

Tabla IX. **Indicadores**

Valor mínimo de resistencia de aislamiento (M Ω) @ 1 minuto	Tipo de equipo en prueba
kV + 1	Mayoría de bobinados hechos antes de 1970, y los no incluidos en los siguientes tipos de equipos
100	Mayoría de bobinados preformados de corriente alterna hechos después de 1970
5	Mayoría de máquinas de bobinado aleatorias y preformado menores a 1kV, y armaduras de corriente continua

Fuente: Tomado de Núñez (2014, p. 2)

Tabla X. Rangos de índice de polarización

Clase de aislamiento	Índice de polarización	Evaluación
B, H y F	2	Aceptable
B, H y F	<2	Problema potencial
B, H y F	>4	Excelente

Fuente: Arnoux (2010, p. 5)

9.6. Fases de estudios

9.6.1. Selección de la muestra

La primera fase, describe el procedimiento adecuado para obtener la muestra motores eléctricos, el método y la manera correcta para obtenerla, sin que se vea afectado por otros factores.

9.6.2. Recolección de datos cuantitativos

En la segunda fase, la recolección de datos se realizará el medidor de resistencia de aislamiento en motores eléctricos marca FLUKE modelo 1507.

9.6.3. Análisis de datos cuantitativos

En la última fase, con la selección y recolección de datos cuantitativos, podremos analizar e interpretar los datos.

La manera a realizarse se describirá en el siguiente capítulo de técnicas de análisis.

9.7. Resultados esperados

Se espera obtener con los datos un informe, sobre el estado del aislamiento de los motores eléctricos reparados y su funcionamiento después de instalados.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

La obtención de datos está basada en recolectar la información con el medidos de resistencia de aislamiento marca FLUKE 1507.

Se obtiene el valor de resistencia de aislamiento e índice de polarización el cual nos indica el estado de los distintos motores analizados.

Con los datos se puede tomar la decisión de darle mantenimiento o sacar para su reparación los motores.

Dependiendo del valor de resistencia y de índice de polarización, y, tomando en cuenta las recomendaciones mínimas que proporciona la norma IEEE 43-2013 sobre medición de aislamiento en motores eléctricos, definimos el plan de acción para cada uno de los motores.

Si en dado caso como lo indica la norma IEEE 43-2013, se tiene un valor de resistencia aceptable, con un valor o superior a 100 MΩ a 1 minuto, pero con un índice de polarización inferior a lo que considera la norma como aceptable, lo cual es un rango de 2 a 4, sino que es inferior su valor, se procede a darle mantenimiento al motor, tratando de liberarlo de contaminantes como el aceite, polvo, químicos y humedad.

Para mantener una línea de producción confiable, se debe efectuar esta medición de aislamiento e índice de polarización, antes del inicio de la cosecha y al finalizar esta, con el objeto de conocer el estado de los mismos.

Así mismo reducir costos por reemplazo sistemas de protección dañados por motores con mal aislamiento y en los mismos motores al recibirlos reacondicionados.

Las técnicas de análisis a utilizar en la investigación, para determinar el valor de resistencia de aislamiento y de índice de polarización aplicado a la norma IEEE 43-2013 serán los siguientes:

10.1. Gráfico circular

Será utilizado para poder identificar los porcentajes de aislamientos de baja resistencia y los índices de polarización bajos.

Se graficarán todos los motores analizados, para poder observar los porcentajes de motores que se encontraron después de la medición, con resistencia de aislamiento e índice de polarización en rangos no aceptable, aceptables y excelentes.

10.2. Gráfico de barras

Se crearán dos tipos de gráficos de barra, unos para cada medición, tanto de resistencia de aislamiento y para índice de polarización.

Su función es hacer un comparativo en las dos mediciones, según la norma IEEE 43-2013.

Primero se grafica entre aceptables, no aceptables y excelentes, los valores de la medición de resistencia de aislamiento, en cumplimiento a las

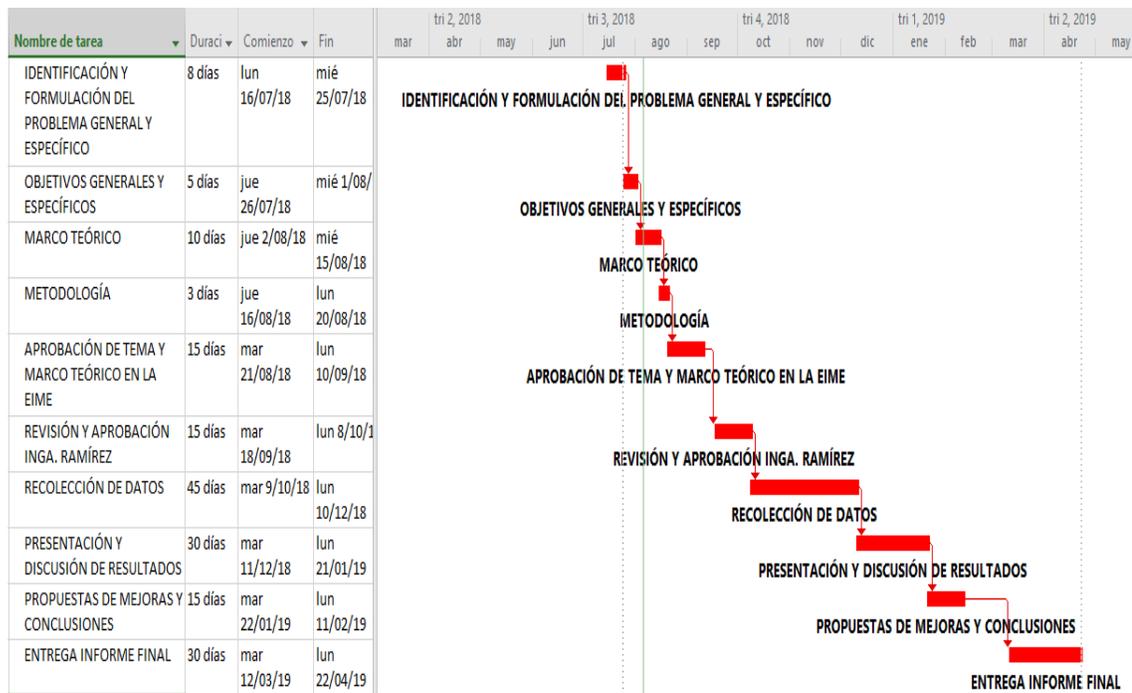
recomendaciones de la norma IEEE 43-2013 que nos presenta los valores para esto.

Se realizará otro gráfico de barra, que se utilizará para los resultados de la medición de índice de polarización, tomando el criterio de la norma IEEE 43-2013, con los rangos de aceptable, no aceptable y excelente.

11. CRONOGRAMA

El tiempo estimado para el desarrollo de las actividades es de 10 meses, contados, a partir del 16.07.2018.

Figura 5. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

12. RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Los recursos utilizados en el trabajo de investigación son descritos a continuación:

12.1. Recursos

12.1.1. Recurso humano

- Investigador: Persona encargada realizar el estudio para la implementación del mantenimiento predictivo.
- Asesor: Persona encargada de brindar el apoyo y asesoría profesional para la elaboración del trabajo de graduación.
- Técnico especialista: Persona subcontratada para utilizar el equipo de medición de resistencia de aislamiento e índice de polarización, en motores eléctricos.
- Supervisor de mantenimiento: Persona encargada de supervisar los trabajos de mantenimiento de la unidad hidráulica.

12.1.2. Recurso de material y equipo

- Medidor de resistencia de aislamiento marca FLUKE 1507
- Multímetro T117 para medición de ausencia de tensión en circuitos

- Computadora
- Cronómetro marca CASSIO
- Agenda
- Cuaderno de notas
- Impresora

Tabla XI. **Recurso financiero**

Descripción	Valor
Asesor de la Investigación	000.00
Papelería	Q 500.00
Trasporte	Q2,250.00
Medidor FLUKE 1507	Q7,000.00
Días hombre en tomas de datos	Q 9,000.00
Días hombre en elaboración de informe	Q 3,375
Total Estimado	Q22,125.00

Fuente: elaboración propia.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abella, M. B. (2003). Mantenimiento Industrial. *Tecnología de máquinas*. Leganés, España.
2. Alren. (2015). *Clasificación de Aislamiento*. Obtenido de Alren: <https://alren.es/documentacion/disenio-electrico/clasificacion-aislamiento/>
3. Association, American Psychological. (2010). *Manual de publicaciones de la American Psychological Association*. D.F., México: El manual moderno.
4. Chapman, S. J. (2000). *Máquinas Eléctricas* (Tercera ed.). Santa Fé de Bogotá, Colombia: Mcgraw-Hill Interamericana, S.A.
5. Charvin Arnoux. (2010). Guía de la medición de aislamiento. *Charvin Arnoux*,
6. Cornú Barrón, E. F., Del Río Vegagil, M. C., Escobedo García, E. P., Guerreros Quiroz, F., & Morales Munguía, D. (2010). Propuesta de un programa de mantenimiento preventivo para la empresa Moraly. *Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional*. D.F., México.

7. Eepusac. (2013). *Normativo de Tesis y trabajos de graduación de la Escuela de Postgrado de la facultad de Ingeniería USAC*. Guatemala, Guatemala: Autor.
8. Electric, Schneider. (2018). ¿Qué tipo de aislamiento debe tener un motor para ser compatible con variadores? ¿Un motor clase F qué picos de tensión admite? (Autor, Ed.) *FAQs técnicas*, 1.
9. Fernández, J. (2015). Mantenimiento predictivo en motores eléctricos (parte 4). *Conatel*.
10. Ferrara G., L. (2014). *Conductores, semiconductores y aislantes*. Obtenido de Depa: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/condsemicondais2_27505.pdf
11. Fitzgerald, A. E. (1980). *Fundamentos de Ingeniería Eléctrica* (Cuarta ed.). (R. Ríos, Trad.) Santa Fé de Bogotá, Colombia: Mcgraw-Hill de México, S.A. de C.V.
12. Fluke Corporation. (2015). Comprobación de resistencia de aislamiento, Washington EEUU. *FLUKE*.
13. Hernández, R. (2010). *Metodología de la Investigación* (Quinta ed.). D.F., México: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V.
14. López, E. (2005). *Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de control*. Obtenido de

http://www.ieec.uned.es/Investigacion/eventos_ieee/archivos/AnalisisMotoresEl%C3%A9ctricos.pdf

15. Megger. (2005). Guía de pruebas de diagnóstico de aislamiento a voltajes superiores a 1 kv. *MEGGER*.
16. Mikalaiunas, A. (2015). *Mantenimiento Preventivo de Motores Eléctricos (parte 2) Prueba de resistencia de aislamiento*. Obtenido de academia.edu:
http://www.academia.edu/8695466/Mantenimiento_Preventivo_de_Motores_El%C3%A9ctricos_parte_2
17. Mora, J. F. (2003). *Máquinas Eléctricas* (Quinta ed.). Madrid: McGraw Hill/Internamericana de España, S.A.U.
18. Muriel, G. &. (2003). Técnicas de Lectura y Redacción. *Algunos conectores textuales*.
19. Núñez, O. (2013). Clase de Aislamiento - Materiales Aislantes. *Motortico*.
20. Núñez, O. (2013). Prueba de Índice de Polarización (PI). *Motortico*.
21. Núñez, O. (2014). Nueva IEEE 43-2013 para ensayos de resistencia de aislación. *Electroindustria*.
22. Núñez, O. (2015). Prueba de Hi-Pot en CD en máquinas rotativas. *Motortico*.

23. Núñez, O. (2016). Consideraciones del factor de Potencia en las máquinas rotativas. *Motortico*.
24. Núñez, O. (2016). Falla de cortocircuito en máquinas rotativas CA. *Motortico*.
25. Núñez, Ó. (2016). Pruebas de aislamiento para motores eléctricos de baja tensión. *Globaltec*.
26. Núñez, O. (2016). Relevancia del monitoreo de condición en el aislamiento de máquinas media tensión. *Motortico*.
27. Núñez, O. (2017). Manteniendo la eficiencia del motor eléctrico durante su reparación. *Motortico*.
28. Núñez, O. (2017). Nueva versión del estándar IEEE 43-2013 - Práctica recomendada para la prueba de resistencia de aislamiento. *Motortico*.
29. Pesántes, Á. (2007). Elaboración de un plan de Mantenimiento Predictivo y Preventivo en Función de la Criticidad de los Equipos del Proceso Productivo de una Empresa Empacadora de Camarón. *Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción*. Guayaquil, Ecuador.
30. Pozueta, D. M. (2015). Aislantes y conductores utilizados en las máquinas eléctricas. *Aislantes y conductores utilizados en las máquinas eléctricas*. Cantabria, España, España.

31. Termogram. (2008). Caso de Análisis: Aislamiento. *Caso de Análisis*, 1.
32. Torrico, J. L. (Septiembre de 2014). Caso análisis de Generador. *PDMA*,
33. Vara, A. A. (2012). *7 pasos para una tesis exitosa* (Tercera ed.). Lima, Perú: Universidad de San Martín de Porres.
34. WEG. (2018). Sistemas de Aislamiento en Motores de Inducción tipo Jaula de Ardilla. *Sistemas de Aislamiento en Motores de Inducción tipo Jaula de Ardilla*.

